

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 482 165**

51 Int. Cl.:

G01N 27/90 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **30.07.2007 E 07788050 (8)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **16.04.2014 EP 2047241**

54 Título: **Procedimiento y dispositivo de control por corrientes de Foucault con funciones de emisión/recepción separadas de una pieza eléctricamente conductora**

30 Prioridad:

03.08.2006 FR 0653277

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:

01.08.2014

73 Titular/es:

**COMMISSARIAT A L'ENERGIE ATOMIQUE ET
AUX ENERGIES ALTERNATIVES (100.0%)
BATIMENT D "LE PONANT" 25, RUE LEBLANC
75015 PARIS, FR**

72 Inventor/es:

DECITRE, JEAN-MARC

74 Agente/Representante:

PÉREZ BARQUÍN, Eliana

ES 2 482 165 T3

Aviso: En el plazo de nueve meses a contar desde la fecha de publicación en el Boletín europeo de patentes, de la mención de concesión de la patente europea, cualquier persona podrá oponerse ante la Oficina Europea de Patentes a la patente concedida. La oposición deberá formularse por escrito y estar motivada; sólo se considerará como formulada una vez que se haya realizado el pago de la tasa de oposición (art. 99.1 del Convenio sobre concesión de Patentes Europeas).

DESCRIPCIÓN

Procedimiento y dispositivo de control por corrientes de Foucault con funciones de emisión/recepción separadas de una pieza eléctricamente conductora

5

Campo técnico

La invención se refiere a un procedimiento y un dispositivo de control por corrientes de Foucault con funciones de emisión/recepción separadas de una pieza eléctricamente conductora.

10

Estado de la técnica anterior

El campo de la invención es el del control por corrientes de Foucault con funciones de emisión/recepción separadas de una pieza eléctricamente conductora, que presenta una gran dinámica de funcionamiento y que usa un conjunto de bobinados de emisión y de recepción muy compacto. Un control semejante es ventajoso en particular para la detección de defectos de pequeño tamaño, en especial para el control no destructivo (CND) de piezas eléctricamente conductoras.

15

El principio de la detección de defectos por corrientes de Foucault en una pieza eléctricamente conductora consiste en emitir en las proximidades de esta pieza, con ayuda de al menos un bobinado de emisión, un campo electromagnético de frecuencia adaptada a la conductividad del material y a la profundidad de los defectos buscados. Se mide entonces, en los bornes de al menos un bobinado de recepción, una fuerza electromotriz debida al acoplamiento directo de las líneas de campo magnético entre el bobinado de emisión y el bobinado de recepción en presencia de la pieza conductora. Se mide igualmente una pequeña variación de esta fuerza electromotriz que se superpone a ella durante la presencia de un defecto en el material. El campo de la invención se limita así a los procedimientos y dispositivos que usan al menos un bobinado afectado por la emisión de la señal electromagnética capaz de generar corrientes de Foucault en la pieza que se someterá a control, y al menos un bobinado afectado por la recepción de las señales inducidas por las corrientes de Foucault, de manera que una configuración semejante se denomina "de funciones separadas".

20

25

30

La fuerza electromotriz inducida V_R en los bornes de cada bobinado de recepción, que está a la misma frecuencia que la corriente enviada en el bobinado de emisión asociado, permite obtener la señal útil después de una demodulación. En presencia de un defecto, esta fuerza electromotriz inducida V_R se convierte en $V_R \pm \delta V_R$, siendo sólo la variación δV_R , muy débil frente a V_R , portadora de información.

35

La detección de defectos, en especial de pequeñas dimensiones, induce una pequeña dimensión de los bobinados (elementos pequeños), y por tanto señales detectadas de muy baja amplitud. Para resolver dicho problema, los dispositivos de la técnica anterior proponen asociaciones de varios bobinados.

40

Así, el documento de referencia [1] del final de la descripción describe un dispositivo de detección de defectos por corrientes de Foucault que comprende al menos una sonda de detección formada por un bobinado de emisión y cuatro bobinados de detección del campo magnético inducido en la pieza que se someterá a control. Los bobinados de recepción están dispuestos de tal manera que sus centros forman los vértices de un rombo que constituyen un primer y un segundo par de bobinados, estando el primer par dispuesto en una diagonal de este rombo conectado en modo común, estando el segundo par dispuesto en la otra diagonal conectado en modo común, estando estos pares de bobinados de recepción primero y segundo conectados en modo diferencial. El bobinado de emisión, alimentado por una corriente alterna, está dispuesto por encima de estos bobinados de recepción, estando el centro del mismo dispuesto por encima del centro del rombo. El dispositivo comprende igualmente un dispositivo que permite conmutar el funcionamiento de cada una de estas sondas. Así, para cada sonda, este dispositivo incluye varios bobinados de recepción, dispuestos de manera simétrica con respecto a un bobinado de emisión y conectados de manera diferencial.

45

50

Este dispositivo de detección de defectos presenta numerosos inconvenientes, que son en especial su pesadez, su coste, y también los defectos inherentes a los montajes diferenciales: las señales indeseables sólo son eliminadas si aparecen en el mismo instante en dos bobinados conectados en oposición, con la misma amplitud y la misma fase. Además los bobinados asociados, y sus vías de medidas respectivas, deben presentar características idénticas.

55

Además, en este documento de referencia [1], cuando el dispositivo de detección de defectos se desplaza por encima de la pieza que se someterá a control, las variaciones de entrehierro, es decir, las variaciones de altura entre este dispositivo y esta pieza son susceptibles de perturbar la señal útil. Estas variaciones de entrehierro se deben principalmente:

60

- a vibraciones durante el desplazamiento del dispositivo, y

65

- al hecho de que el dispositivo no puede adaptarse con precisión a la superficie local de una pieza compleja.

La invención tiene por objeto paliar dichos inconvenientes proponiendo un procedimiento y un dispositivo de control por corrientes de Foucault con funciones de emisión/recepción separadas de una pieza eléctricamente conductora, poco sensibles al ruido de entrehierro reduciendo al mínimo la variación de la señal útil debida a una variación de entrehierro accidental.

5 **Exposición de la invención**

10 La invención se refiere a un procedimiento de control por corrientes de Foucault con funciones de emisión/recepción separadas de una pieza eléctricamente conductora de conductividad eléctrica σ_1 y de permeabilidad magnética relativa μ_{r1} , en el que un sensor, que comprende al menos un conjunto formado por al menos un bobinado de emisión de un campo electromagnético y al menos un bobinado de recepción influido por los campos electromagnéticos producidos por medio de corrientes de Foucault inducidas en esta pieza, se desplaza por encima de esta pieza, caracterizado por las etapas definidas en la reivindicación 1.

15 Ventajosamente los bobinados de emisión y de recepción están dispuestos a los dos lados de un soporte, que puede ser flexible, por ejemplo una película de kapton, en el que los bobinados están grabados. Ventajosamente la gama de frecuencias usadas está comprendida entre algunos hercios, por ejemplo 10, y 50 MHz.

20 Ventajosamente en el centro de cada bobinado y/o en las proximidades de cada bobinado, en el lado opuesto al de la pieza que se someterá a control, está dispuesto un material magnético de manera que disminuya la reluctancia del circuito magnético de cada par de bobinado de emisión/bobinado de recepción.

El procedimiento de la invención presenta en especial las ventajas siguientes:

25 - La optimización de la distancia entre el bobinado de emisión y el bobinado de recepción del sensor permite reducir al mínimo la influencia del ruido de entrehierro en la señal útil.

30 - Un mismo sensor puede adaptarse a diferentes piezas que se someterán a control con varios radios de curvatura, permitiendo barrer ("scan") superficies en tres dimensiones con una resolución espacial fina.

- En caso de adelgazamiento de la superficie de desgaste del soporte, por ejemplo una película de kapton, durante el barrido repetido del sensor en la pieza que se someterá a control, los ajustes del aparato que integra el sensor (en especial el equilibrado) se mantienen idénticos.

35 - Un sensor en película de kapton permite un grabado simultáneo de los bobinados de emisión y de recepción, de sus cables de alimentación y de sus conectores, lo que reduce los costes de realización y de mantenimiento debido a la ausencia de soldaduras.

40 - El sensor así obtenido presenta una buena sensibilidad, una buena relación señal-ruido, y permite una gran densidad de bobinados debido al recubrimiento de los bobinados de emisión y de recepción.

El procedimiento de la invención puede usarse en numerosos ámbitos, en especial:

45 - en el ámbito nuclear, para las zonas de transición de mandrinado (ZTM) en los tubos de generadores de vapor,

- en el ámbito aeronáutico en el caso de piezas complejas.

50 La invención se refiere igualmente a un dispositivo de control por corrientes de Foucault con funciones de emisión/recepción separadas de una pieza eléctricamente conductora, caracterizado porque comprende las características definidas en la reivindicación 9.

Ventajosamente se dispone un aislante eléctrico entre dos líneas consecutivas.

55 **Breve descripción de los dibujos**

La figura 1 ilustra un esquema de principio de un sensor que pone en práctica el procedimiento de la invención.

60 La figura 2 ilustra la tensión de acoplamiento compleja obtenida en los bornes de un bobinado de recepción de un sensor en función de la distancia d entre el bobinado de emisión correspondiente y este bobinado de recepción.

La figura 3 ilustra las diferencias de tensión de acoplamiento entre las curvas de la figura 2.

65 La figura 4 ilustra un ejemplo de realización de un sensor optimizado obtenido usando el procedimiento de la invención.

Las figuras 5A y 5B ilustran una configuración multielementos del dispositivo de la invención.

Exposición detallada de formas de realización particulares

- 5 El sensor ilustrado en la figura 1, comprende un bobinado de emisión 11 (radio r_1) y un bobinado de recepción 12 (radio r_2) dispuestos a los dos lados de un soporte 10. Estos bobinados 11 y 12 pueden, por ejemplo, estar grabados a los dos lados de un soporte flexible 10 de kapton. El bobinado 11, que se elige arbitrariamente como bobinado de emisión, es alimentado por una corriente I . El bobinado 12 es entonces el bobinado de recepción, en los bornes del cual se mide una tensión V .
- 10 Estos dos bobinados 11 y 12 pueden tener ventajosamente las mismas características geométricas. Sus centros están separados una distancia d . El conjunto de estos bobinados 11 y 12 en el soporte 10 está situado a una distancia e , denominada entrehierro, de una pieza conductora 13 que se someterá a control.
- 15 En ausencia de defectos en la pieza 13, la tensión V , medida en los bornes del bobinado de recepción 12, es debida al acoplamiento electromagnético entre los dos bobinados 11 y 12: una parte del campo magnético alternativo emitido por el bobinado de emisión 11 que atraviesa el bobinado de recepción 12. Este campo magnético induce una tensión de igual frecuencia que recibe el nombre de tensión de acoplamiento o inducción mutua.
- 20 La figura 2 ilustra la tensión de acoplamiento compleja obtenida en los bornes del bobinado de recepción 12 en función de la distancia d (en mm) entre los dos bobinados 11 y 12 para tres valores de entrehierro:
- $e = 100 \mu\text{m}$: curva 20,
 - $e = 120 \mu\text{m}$: curva 21, y
 - $e = 150 \mu\text{m}$: curva 22.
- 25 Los otros parámetros son los siguientes:
- 30 - diámetro exterior de los bobinados 11 y 12: 1 mm,
 - diámetro interior de los bobinados 11 y 12: 0,5 mm,
 - estando cada bobinado 11 y 12 formado por seis espiras con un paso de $45 \mu\text{m}$, de $5 \mu\text{m}$ de altura,
 - 35 - soporte 10 flexible de grosor $50 \mu\text{m}$,
 - frecuencia de trabajo: 10 MHz.
- 40 El procedimiento de la invención incluye las etapas siguientes:
- obtención de una primera curva 20 de tensión compleja en los bornes de un bobinado de recepción 12, en función de la distancia entre el bobinado de emisión 11 correspondiente y este bobinado de recepción, para la distancia nominal, que es la distancia media entre la pieza y la parte la más próxima de los bobinados cuando el sensor está adherido a la pieza (valor de entrehierro mínimo), entre el sensor y una parte sin defectos de esta pieza u otra pieza sin defectos en la que, por ejemplo, la conductividad eléctrica σ_2 es tal que $0,05 \times \sigma_1 \leq \sigma_2 \leq 20 \times \sigma_1$ y la permeabilidad magnética relativa μ_{r2} es tal que $0,05 \times \mu_{r1} \leq \mu_{r2} \leq 20 \times \mu_{r1}$,
 - 45 - obtención de al menos una segunda curva de tensión compleja 21, 22 en los bornes de un bobinado de recepción, en función de la distancia entre el bobinado de emisión correspondiente y este bobinado de recepción, para al menos una distancia e diferente de la distancia nominal entre el sensor y una parte sin defectos de esta pieza u otra pieza sin defectos,
 - 50 - determinación de al menos una distancia dada d_i que reduce al mínimo el módulo de la diferencia entre la primera curva 20 y la al menos una segunda curva 21, 22,
 - 55 - cálculo de la media aritmética d de la al menos una distancia dada d_i , siendo esta media aritmética d igual al valor de d_i cuando existe sólo una distancia d_i ,
 - 60 - elección de esta media aritmética $\pm 20\%$ como distancia entre los dos bobinados de emisión y de recepción
 - detección de la posible presencia de uno o varios defectos en esta pieza.
- 65 Las diferencias de tensión de acoplamiento entre las curvas 21 y 22 y la curva de referencia 20 están representadas en las curvas 30 y 31 de la figura 3.

Se constata que estas curvas 30 y 31 pasan por un mínimo para las abscisas 32 de $d_1 = 790 \mu\text{m}$ y de $d_2 = 788 \mu\text{m}$ para los dos saltos de entrehierro de $20 \mu\text{m}$ y $50 \mu\text{m}$. Estas distancias d_1 y d_2 reducen así al mínimo la influencia de una variación del entrehierro. El procedimiento de la invención propone de este modo disponer los bobinados 11 y 12 a una distancia $d = (d_1 + d_2)/2 \pm 20\%$.

Se ilustra un ejemplo de realización de un sensor así optimizado, que es por tanto menos ruidoso especialmente en superficies complejas, según la figura 4. En este ejemplo, existe un recubrimiento entre el bobinado de emisión 40 y cada bobinado de recepción 41 y 42. Cada distancia optimizada d_1 (entre los bobinados 40 y 41) y d_2 (entre los bobinados 40 y 42) es superior al menor de los radios de los bobinados 40, 41 ó 42 e inferior a la suma de los radios de los dos bobinados de emisión y de recepción correspondientes. En este ejemplo cada bobinado incluye un orificio metalizado 43 en su centro. Sin embargo, los bobinados de emisión y/o de recepción pueden tener una única espira. En este caso los orificios metalizados 43 no son necesarios.

La distancia d óptima entre el bobinado de emisión y un bobinado de recepción 41 ó 42 puede determinarse experimentalmente:

- grabando el bobinado de emisión 40 y un bobinado de recepción 41 ó 42 en dos soportes distintos y midiendo la tensión de acoplamiento para diferentes valores d y e , o

- probando una serie de elementos, cada uno con un bobinado de emisión 40 y uno o varios bobinados de recepción 41, 42, con distancias d variables entre los bobinados de emisión y de recepción.

El procedimiento de la invención se pone en práctica ventajosamente en una gama de frecuencias usada habitualmente en el campo del control no destructivo por corrientes de Foucault, es decir, de algunos hercios, por ejemplo, de 10 a 50 MHz.

En variantes de realización del procedimiento de la invención, se puede usar un sensor que comprende:

- bobinados de emisión y de recepción que no tienen las mismas características geométricas,

- varios bobinados de recepción no idénticos, colocados a distancias d de un bobinado de emisión, optimizadas por el procedimiento de la invención,

- bobinados de emisión y de recepción de forma compleja: por ejemplo poligonal, ovalada, espira o espiras cualesquiera,

- bobinados de emisión o de recepción de un elemento compuestos por varios bobinados conectados en serie. Por ejemplo, un bobinado puede estar compuesto por dos bobinados coaxiales y grabados enfrentados en cada una de las caras de una película de kapton y conectados en serie por medio del orificio metalizado y cuyos sentidos de devanado son de tal forma que las tensiones en sus bornes se suman,

- bobinados de emisión o de recepción compuestos por dos bobinados (o más) no coaxiales conectados en diferencial y alejados del bobinado de emisión correspondiente en una distancia próxima,

- un material magnético dispuesto en el centro de cada uno de los bobinados y/o en las proximidades de cada bobinado (en el lado opuesto al de la pieza que se someterá a control) de manera que disminuya la reluctancia del circuito magnético de cada par de bobinado de emisión/bobinado de recepción,

- bobinados multicapas, por ejemplo varias películas de kapton apiladas y dispuestas en serie,

- componentes electrónicos, por ejemplo amplificadores, multiplexores, demoduladores..., dispuestos en el soporte,

- una configuración multielementos.

Una configuración multielementos comprende varios elementos dispuestos en un mismo sustrato, por ejemplo una barra asociada a un desplazamiento mecánico en un eje o una disposición en matriz que permite evitar todo desplazamiento mecánico. Dicha configuración permite limitar el tiempo de inspección de la superficie de las piezas. Sin embargo, el tamaño de un elemento compuesto por al menos dos bobinados, en especial previsto para la detección de pequeños defectos, es más importante a menudo que el paso p máximo requerido entre dos elementos, estando el paso p determinado de tal manera que, con independencia de cuál sea la posición de un defecto en una pieza, al menos un elemento pueda detectar su presencia.

Una primera solución que permite aumentar la densidad de los elementos para alcanzar el paso p consiste en disponer los elementos en varias líneas, al tresbolillo, todos a la misma altura, en el mismo soporte. Así, si el elemento es dos veces más ancho que el paso p deseado, se usan dos líneas de elementos, estando los elementos

en una misma línea separados por $2p$. Una configuración semejante plantea problemas para aprovechar los datos en la medida en que no existe coherencia espacial de las diferentes líneas, lo que obliga a usar una etapa de postratamiento antes de analizar las cartografías (traslación de las líneas).

5 Una segunda solución, ilustrada en la figura 5A consiste en apilar líneas de elementos 50 que incluyen un bobinado de emisión 51 y un bobinado de recepción 52, siempre al tresbolillo, colocando uno sobre otro al menos dos sustratos 53 y 54 (por ejemplo películas de kapton flexibles) con aislantes intermedios 55 y 56, estando cada línea desplazada con respecto a la siguiente el paso p . Usando elementos "clásicos", es decir, cuya distancia d entre el
10 bobinado de emisión 51 y el bobinado de recepción 52 no está optimizada, la fuerza electromotriz inducida V_R en los bornes de los bobinados de recepción es diferente según la capa de pertenencia del elemento. Este hecho hace que la etapa de equilibrado del aparato de corrientes de Foucault sea delicada, en especial en el caso de elementos multiplexados.

15 En la figura 5B, que ilustra más en particular un elemento, se usan las mismas referencias que en la figura 1, añadiendo un aislante 60.

La optimización de la distancia entre el bobinado de emisión y el bobinado de recepción según la invención, permite obtener elementos cuya fuerza electromotriz inducida V_R tiene el mismo valor, con independencia de cuál sea la distancia entre la pieza 58 y el elemento. Esta configuración está por tanto adaptada especialmente al procedimiento
20 de optimización de la distancia de la invención.

Referencias

[1] US 6310476

REIVINDICACIONES

1. Procedimiento de control por corrientes de Foucault con funciones de emisión/recepción separadas de una pieza eléctricamente conductora (13) de conductividad eléctrica σ_1 y de permeabilidad magnética relativa μ_{r1} , en el que un sensor, que comprende al menos un conjunto formado por al menos un bobinado de emisión (11) de un campo electromagnético y al menos un bobinado de recepción (12) influido por los campos electromagnéticos producidos por medio de corrientes de Foucault inducidas en esta pieza (13), se desplaza por encima de esta pieza, caracterizado porque incluye las etapas siguientes:
- 5
- 10 - obtención de una primera curva (20) de tensión compleja en los bornes de un bobinado de recepción (12), en función de la distancia entre el bobinado de emisión (11) correspondiente y este bobinado de recepción, para la distancia nominal entre el sensor y una parte sin defectos de esta pieza u otra pieza sin defectos,
- 15 - obtención de al menos una segunda curva de tensión compleja (21, 22) en los bornes de un bobinado de recepción, en función de la distancia entre el bobinado de emisión correspondiente y este bobinado de recepción, para al menos una distancia (e) diferente de la distancia nominal entre el sensor y una parte sin defectos de esta pieza u otra pieza sin defectos,
- 20 - determinación de al menos una distancia dada d_i que reduce al mínimo el módulo de la diferencia entre la primera curva (20) y la al menos una segunda curva (21, 22),
- 25 - elección de la distancia $d_i \pm 20\%$ como distancia entre los ejes de los dos bobinados de emisión y de recepción cuando existe sólo una distancia d_i y elección de la media aritmética $d_i \pm 20\%$ de la distancia d_i cuando existen al menos dos distancias d_i entre los dos bobinados de emisión y de recepción,
- 30 - detección de la posible presencia de uno o varios defectos en esta pieza.
2. Procedimiento según la reivindicación 1, en el que, en la parte sin defectos de la pieza o en otra pieza sin defectos, la conductividad eléctrica σ_2 es tal que $0,05 \times \sigma_1 \leq \sigma_2 \leq 20 \times \sigma_1$ y la permeabilidad magnética relativa μ_{r2} es tal que $0,05 \times \mu_{r1} \leq \mu_{r2} \leq 20 \times \mu_{r1}$.
3. Procedimiento según la reivindicación 1, en el que la etapa de obtención de al menos dos curvas se realiza por medida o por cálculo.
- 35 4. Procedimiento según la reivindicación 1, en el que los bobinados de emisión y de recepción están dispuestos a los dos lados de un soporte.
- 40 5. Procedimiento según la reivindicación 4, en el que el soporte es un soporte flexible en el que los bobinados de emisión y de recepción están grabados.
- 45 6. Procedimiento según la reivindicación 5, en el que el soporte flexible es una película de kapton.
- 50 7. Procedimiento según la reivindicación 1, en el que la gama de frecuencias usadas está comprendida entre 10 Hercios y 50 Megahercios.
- 55 8. Procedimiento según la reivindicación 1, en el que un material magnético está dispuesto en el centro de cada bobinado y/o en las proximidades de cada bobinado, en el lado opuesto al de la pieza que se someterá a control, de manera que disminuya la reluctancia del circuito magnético de cada par de bobinado de emisión/bobinado de recepción.
9. Dispositivo de control por corrientes de Foucault con funciones de emisión/recepción separadas de una pieza eléctricamente conductora, caracterizado porque comprende:
- 60 - al menos dos líneas constituidas por al menos un elemento formado por al menos un bobinado de emisión (11) de un campo electromagnético y al menos un bobinado de recepción (12) dispuestos a los dos lados de un soporte flexible (10), cuyos ejes están separados una distancia dada;
- porque:
- 65 - cada línea está desplazada de la siguiente una distancia p , estando cada bobinado de la misma naturaleza en una misma línea a una distancia $n \times p$ de su vecino más cercano, siendo n el número de líneas;
- y porque comprende:
- 65 - medios de elección de la distancia $d_i \pm 20\%$ como distancia entre los ejes de los dos bobinados de emisión y de recepción cuando existe sólo una distancia d_i y elección de la media aritmética $d_i \pm 20\%$ de la distancia d_i cuando

existen al menos dos distancias d_i entre los dos bobinados de emisión y de recepción, reduciendo esta distancia d_i al mínimo el módulo de la diferencia entre una curva de tensión compleja (20) para una distancia nominal entre el sensor y una parte sin defectos de esta pieza u otra pieza sin defectos y al menos una curva de tensión compleja (21, 22) para al menos una distancia diferente de la distancia nominal.

- 5
10. Dispositivo según la reivindicación 9, en el que al menos dos líneas están a alturas diferentes.
 11. Dispositivo según la reivindicación 9, en el que un aislante eléctrico está dispuesto entre dos líneas consecutivas.

FIG.1

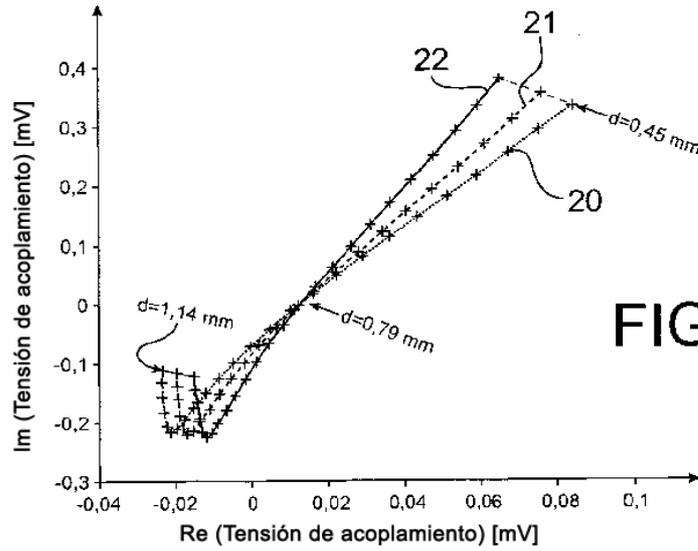
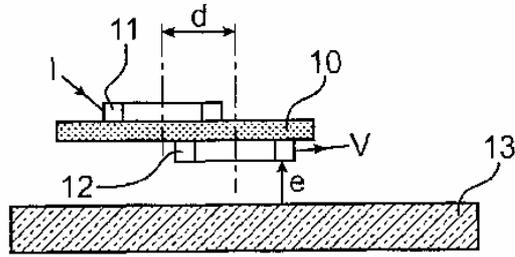


FIG.2

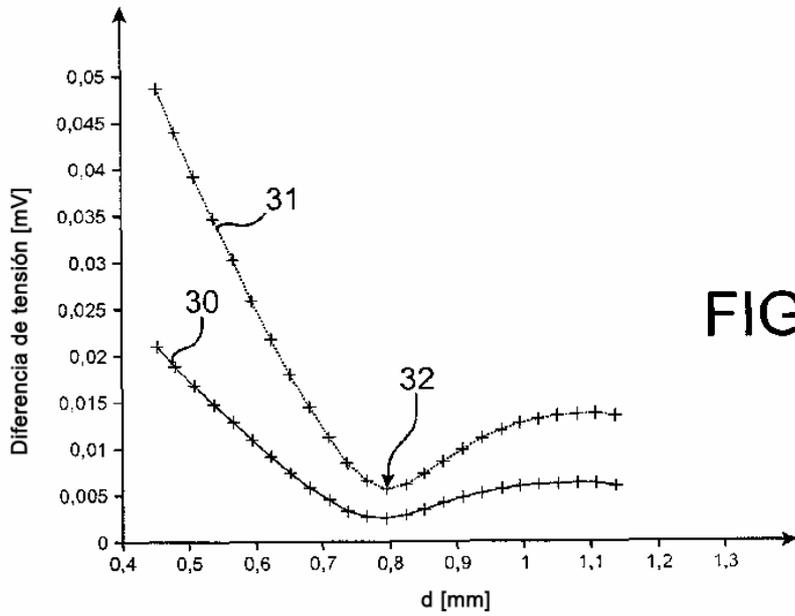


FIG.3

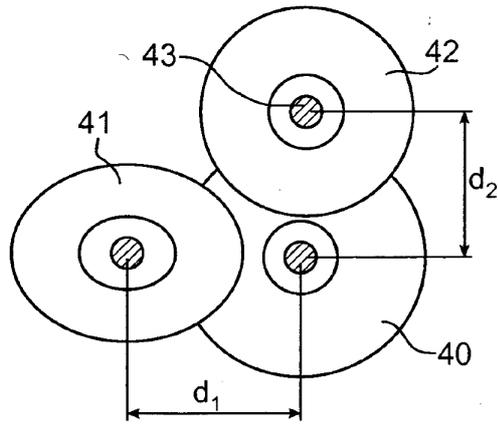


FIG. 4

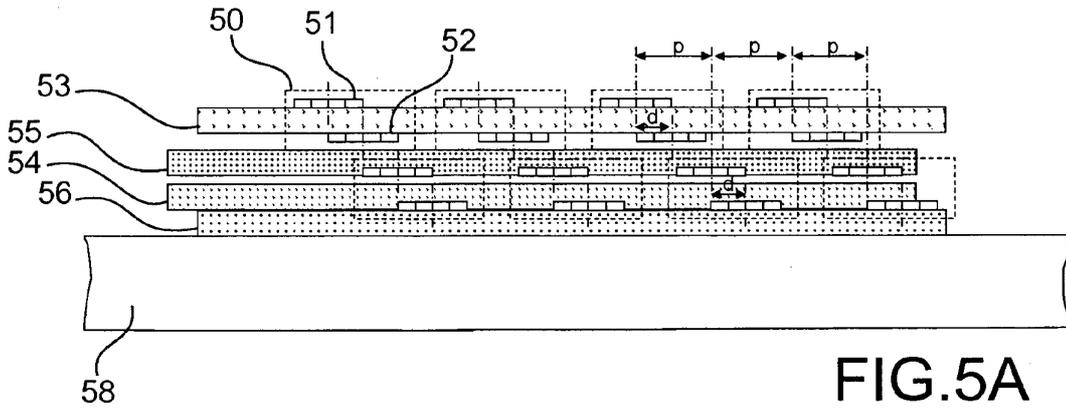


FIG. 5A

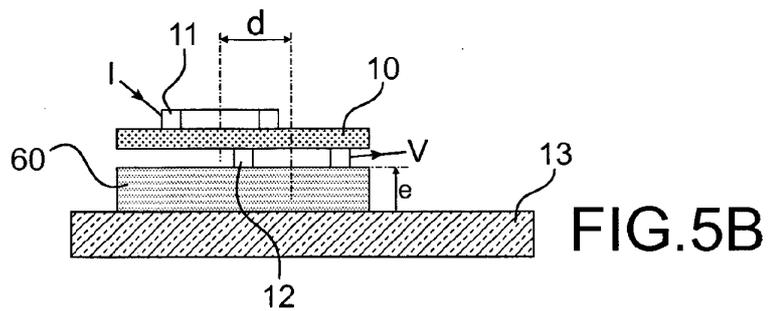


FIG. 5B